



Rapport intermédiaire stage ZoNéCo :

Cartographie des herbiers à phanérogames
de Nouvelle-Calédonie

&

Cartographie des habitats récifo-lagonaires
des sites « Pêcheurie Récifale »

Guillaume Dirberg
sous la direction de Serge Andréfouët

Juin 2005

Sommaire

1	Contexte et objectifs.....	3
2	Calendrier des opérations	4
3	Inventaire des images disponibles et dates de disponibilité.....	4
4	Méthodologie de traitements des images	6
4.1	Prétraitement des images.....	6
4.2	De l'image au terrain.....	7
4.3	Le travail de terrain	7
4.3.1	Les herbiers	7
4.3.2	Les habitats récifo-lagonaires.....	7
4.4	Du terrain a la carte	8
4.5	Index corallien.....	9
4.6	Synthèse des sites visités.....	10
5	Etats des lieux, problèmes rencontrés et résultats préliminaires.....	13
5.1	Typologie des herbiers et cartographie	13
5.1.1	Typologie générale des herbiers de Nouvelle-Calédonie.....	13
5.1.2	Exemple d'une cartographie d'herbiers à partir d'une image Landsat7	15
5.1.3	Apport de la haute résolution : exemple d'une classification à partir d'une image Quickbird.....	17
5.2	Typologie habitats Koné et cartographie partielle.	21
5.2.1	Typologie basée sur les données de terrain.....	21
5.2.2	Exemple de carte thématique	22
5.3	Indice Corallien	23
5.4	Problèmes rencontrés	26
6	Perspectives.....	26
7	Bibliographie.....	27
	Remerciements.....	28

1 Contexte et objectifs

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'action 2 du thème « Habitats récifo-lagonaires de Nouvelle Calédonie » du programme ZoNéCo 2004. L'ensemble du projet est centré sur la cartographie des habitats récifo-lagonaires à partir d'imagerie haute résolution (Quickbird, IKONOS) et l'évaluation de certaines techniques. Spécifiquement, l'objectif de ce travail est :

- la cartographie des habitats récifaux des sites sélectionnés par le projet ZONECO « Pêcheries Récifales »
- une cartographie des herbiers à phanérogames sur l'ensemble de la Calédonie
- une évaluation de la technique d'index corallien (Bour et al. 1990) pour le suivi de l'état de santé des récifs à partir de données de télédétection dans le contexte calédonien

La cartographie des habitats récifaux constitue la première étape d'une analyse spatiale de la relation entre les communautés récifales lagonaires et leur habitat. D'un point de vue commercial, la diversité et l'abondance de la ressource halieutique sont liées à la qualité et à la diversité de l'habitat. L'imagerie satellitale haute résolution, avec un traitement et un travail de terrain adapté, permet d'obtenir une cartographie rapide, à faible coût et à grande échelle des habitats. Il est ainsi possible d'étendre l'analyse réalisée traditionnellement à petite échelle à l'ensemble d'un récif ou d'un complexe récifal. A ce titre, ZONECO finance la cartographie des habitats des zones déjà retenues pour la fiche « Pêcheries Récifales » dont le but est de caractériser les communautés ichthyologiques totales et commerciales. Six sites sont retenus, deux dans chaque Province : Kone, Ouassé, Moindou, Thio, Lifou (2 sites). Ces sites sont à cartographier à partir d'images multispectrales de haute résolution spatiale (2.4 m) de type Quickbird.

Au sein d'un complexe récifal, les herbiers à phanérogames constituent un habitat remarquable et fragile. Des espèces emblématiques comme les dugongs et les tortues sont liées à cet habitat qui a également un rôle important dans le cycle de vie de nombreuses espèces de poissons. La cartographie des herbiers permettra de connaître l'étendu de cet habitat et de fixer un point de départ pour un éventuel suivi de l'évolution de cet habitat. A ce titre, ZONECO finance la cartographie complète de la présence d'herbiers en Nouvelle-Calédonie. L'imagerie de base utilisée est de type Landsat (30 m de résolution spatiale), mais elle est complétée par des images haute résolution Quickbird pour évaluer la faisabilité d'une cartographie thématique des différents types d'herbiers (et non simplement un index binaire « présence/absence »). Les sites de Kone et Moindou retenus pour « Pêcheries Récifales » sont riches en herbiers et servent à cette évaluation, mais compte-tenu de la présence de complexe récifal de structures différentes, nous avons également proposé les sites de Balabio-Pouébo en Province Nord et du Lagon Sud en Province Sud,.

Les techniques d'évaluation de la santé des récifs coralliens reposent souvent sur l'estimation de la couverture corallienne. Elles permettent d'effectuer un suivi de l'état de santé d'un récif mais peuvent également permettre d'évaluer l'impact d'un événement exceptionnel comme un cyclone, un épisode de blanchissement ou une attaque d'étoiles de mer corallivores *Acanthaster planci*. Alors que la cartographie d'habitats est maintenant bien

maitrisée, il n'est pas démontré aujourd'hui que les images de télédétection multispectrales peuvent permettre d'estimer directement la couverture corallienne avec précision pour n'importe quel site, mais cela reste à vérifier pour des sites contrastés. En Nouvelle Calédonie, la technique d'index corallien a été appliquée sur des photos aériennes verticales dans le but d'obtenir des cartes thématiques de recouvrement corallien, mais leur taux d'erreur n'a pas été quantifié. Il s'agira ici de revisiter cette technique afin de savoir si un index corallien simple peut être réellement appliqué au contexte calédonien. Le site test retenu est le récif Aboré au large de Nouméa.

Ces trois objectifs complémentaires peuvent être menés en parallèle car ils s'appuient sur des jeux de données et des techniques de traitements de l'image qui sont proches.

2 Calendrier des opérations

Tableau 1 : Calendrier de travail de terrain effectué pour le programme ZoNéCo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
oct				Balabio													I												A	I	A					
nov			Koné														I	A																		
déc									A			A			A		A						A				A									
jan			A	A	A	A																											A			
fév							A							I		I										I										
mar																																				
avr																																				
mai												A					A																			
juin																A																				

A apprentissage Aboré

A vérité terrain Aboré

I vérité terrain herbiers îlots du lagon SO

Le tableau ci-dessus synthétise le travail de terrain que j'ai effectué durant mon stage. La phase d'apprentissage pour les herbiers de lagon sud-ouest a été réalisée avant le début de mon stage par une autre stagiaire : Mathilde Scamps. Les missions Koné et Balabio regroupaient simultanément les phases d'apprentissage et de validation (cf Méthodes, chapitre 4).

3 Inventaire des images disponibles et dates de disponibilité

Nous disposons de :

- 15 images Landsat7ETM+ couvrant la quasi-totalité du lagon, de la barrière à la côte ; 13 d'entre elles nous ont été fournies par le SMAI le 26 novembre.

- une images haute résolution Ikonos d'avril 2002 couvrant la moitié sud du récif Aboré.

A cela s'ajoute les images haute résolution Quickbird (QB) acquises spécialement pour le programme ZoNéCo. Le calendrier de réception de ces données est détaillé, puisque cela a eu quelques incidences sur le calendrier des opérations.

20/12/2004 : réception des images QB de Balabio, Balade, Koné et Moindou, constatation d'un important problème de géoréférencement des images de Balabio (cf figures 1 et 2)

19/01/2005 : réception des nouvelles images QB de Balabio,

01/02/2005 : réception des images QB des îlots du lagon sud et d'Aboré, constatation d'un problème de couverture nuageuse importante et argumentaire avec SPOT Image sur la définition des paramètres de couverture nuageuse.

Notre divergence de point de vue avec le fournisseur quant à la qualité des images a deux origines :

- les algorithmes calculant les couvertures nuageuses utilisés par DigitalGlobe sont destinés à travailler en milieu terrestre où les radiances sont plus grandes d'un ordre de grandeur qu'en milieu marin. Ils tendent donc à sous estimer largement la couverture nuageuse lorsqu'ils sont appliqués au milieu marin.
- même si une couverture nuageuse maximale de 10% est autorisée lors de la commande de l'image, cette couverture nuageuse est en fait calculée sur la scène complète et non sur la zone d'intérêt commandée qui est généralement une sous-zone de la scène complète. Ceci rend toujours risquée toute commande et donc l'obtention de données de bonne qualité lorsqu'elles ne sont pas déjà en archive et visualisables. Si l'image commandée obéit aux spécifications, elle doit être achetée..

18/03/2005 : réception des image QB de Lifou et Thio

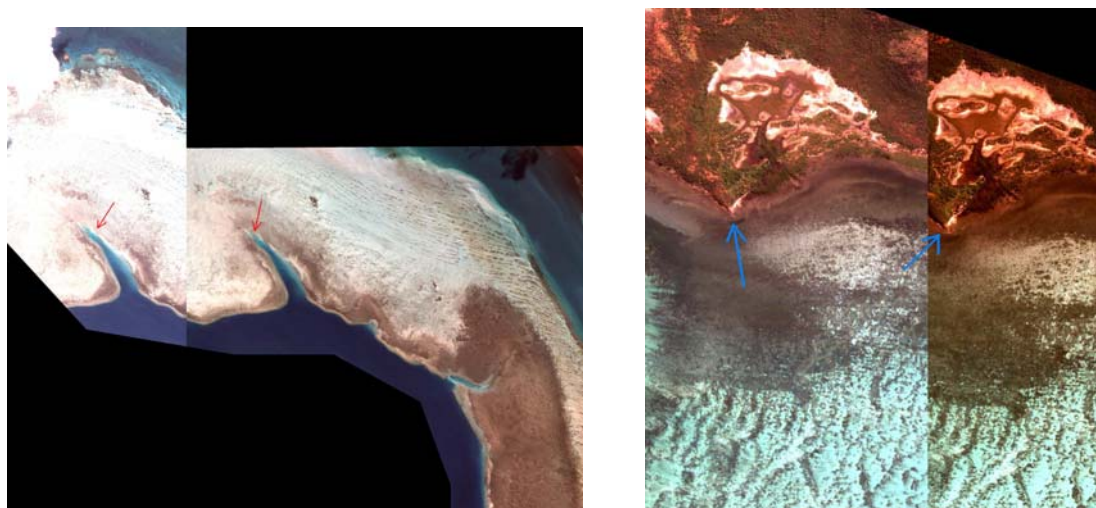


Figure 1 : Mise en évidence du problème de géoréférencement lors de la création automatique (i.e. à partir des coordonnées géographiques uniquement, sans intervention humaine) d'une mosaïque. Les décalages géographiques entre images ont pour conséquence que la même zone apparaît deux fois sur la mosaïque.

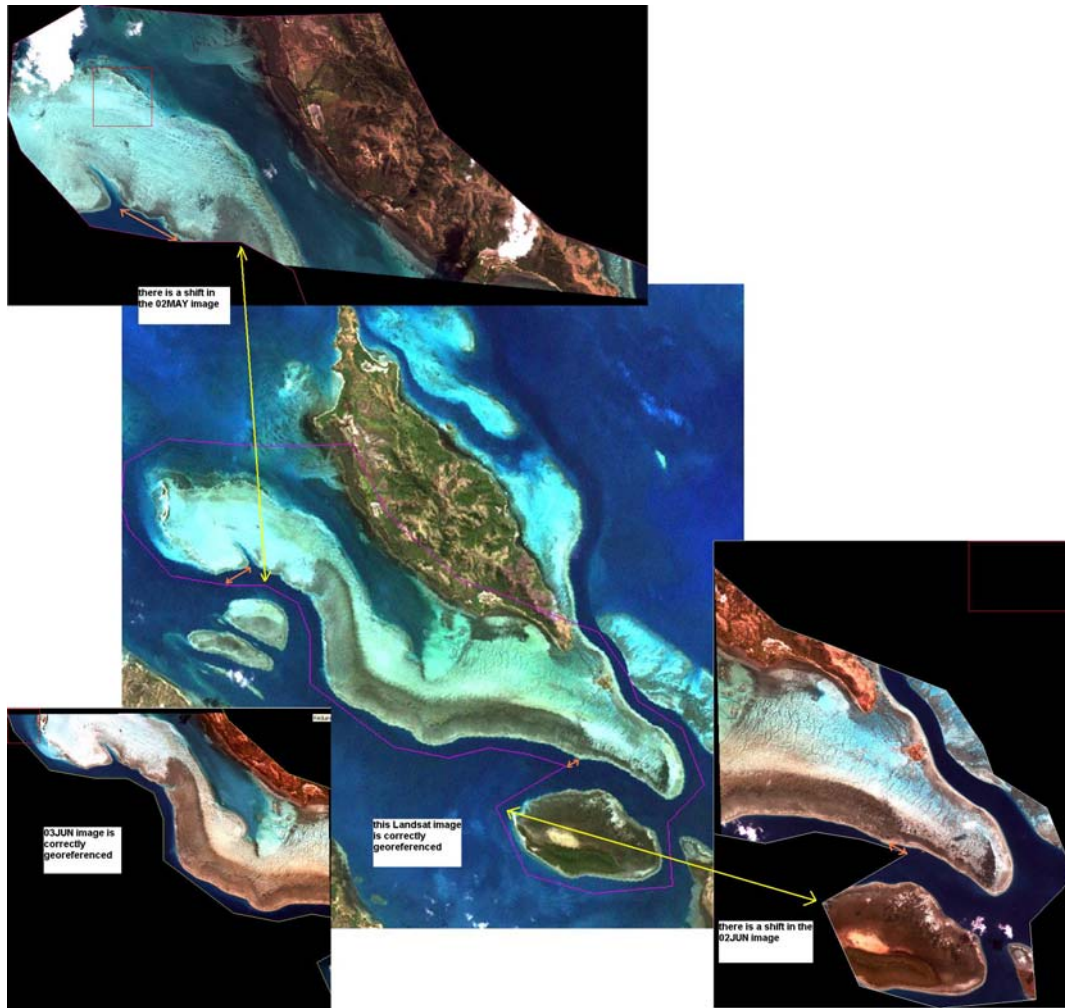


Figure 2 : Comparaisons des trois images QB avec une image Landsat7 sur laquelle la zone commandée est visualisée par un polygone violet: deux des images QB fournies présentent un problème de troncature (mis en évidence par les flèches) dû à un problème de calibration des informations de géoréférencement.

4 Méthodologie de traitements des images

4.1 Prétraitement des images

La première étape consiste à traiter l'image de manière à améliorer sa qualité (géométrique ou radiométrique) et à la rendre plus facilement exploitable.

Les scènes Quickbird sont corrigées du « glint » (réflexion spéculaire) par la méthode décrite par Hochberg et al. (2003) si elles présentent beaucoup de vagues, ou un voile de brume.

Par ailleurs, dans le cas où l'ensemble de la zone étudiée est couverte par des images prises à des dates différentes et dans des conditions différentes, il est nécessaire de réaliser une mosaïque (création d'une image à partir de plusieurs). Les scènes sont d'abord géoréférencées entre elles et corrigées radiométriquement en utilisant des zones invariantes (ou jugées invariantes, tels que zone sableuse etc...) dans les zones de recouvrement des scènes.

4.2 De l'image au terrain

En prélude à la phase de terrain, nous repérons sur l'image les zones sur lesquels nous allons récolter des données. Ces zones sont choisies *a priori* pour leur représentativité ou leur singularité thématique, en se basant sur leur couleur, leur forme, leur texture. Le but est de pouvoir visiter dans le temps limité imparti à la phase terrain (typiquement une semaine) le maximum d'habitats différents. L'hypothèse de travail est que les variations de couleur et texture capturent les variations de couverture benthique et de profondeur et donc d'habitats.

4.3 Le travail de terrain

Les stations de travail visitées se répartissent en **stations quantitatives et en stations semi-quantitatives**. Les quantitatives comprennent des transects de mesure de couverture benthique plus des quadrats dans les herbiers (cf 4.3.1). Les stations semi-quantitatives comprennent des transects sur 30m ou des points de caractérisation d'habitats réalisés à partir de la fiche « Habitat » présentée ci-dessous. Celle-ci provient de l'évolution d'une fiche habitat établie par l'IRD pour les comptages poissons, puis modifiée par la CPS (Equipe ProcFish, Laurent Vigliola) dans le même but, puis à nouveau modifiée pour la cartographie destinée à ZoNéCo.

4.3.1 Les herbiers

La première étape, étape d'apprentissage, consiste, sur les sites pré-sélectionnés, à réaliser une série de quadrats (0.25m²) et de transects linéaires (20m). De retour à terre, le contenu spécifique des quadrats est identifié et quantifié (poids sec). La méthodologie est détaillée dans Scamps (2005)). Ces données permettront un inventaire détaillé des communautés présentes et de créer une typologie des herbiers (voir plus loin).

La deuxième étape consiste à réaliser un maximum de points de contrôle pour lesquels sont relevés des données de composition spécifique, de profondeur et de couverture (ratio des superficies relatives végétaux/substrat). Ces données servent à valider les cartes réalisées (voir plus loin). Idéalement cette étape est réalisée après que la typologie ait été définie, mais dans le cas de sites lointain pour lesquels le nombre et la durée des missions sont limités, les deux étapes s'effectuent simultanément.

Ces points de vérité terrain sont normalement réalisés de manière aléatoire et essayant de couvrir la plus large zone possible. Pratiquement, il est plus intéressant de multiplier les points dans les zones d'intérêt et difficiles (herbiers, algueraies, zones coralliennes) que dans les zones de grande étendue mais facilement discriminable à l'image (sable, débris), quitte à rajouter pour ces derniers des points par photo-interprétation lors de l'étape de validation.

4.3.2 Les habitats récifo-lagonaires

De la même façon que pour les herbiers, deux étapes se succèdent.

La première phase est une phase d'apprentissage et de collecte d'information sur les habitats rencontrés sur le site. Ceci consiste à renseigner des « fiches habitats » le long de transects de 30m, et ce parallèlement à la méthode standard d'évaluation de couverture LIT (Line Intercept Transect). Cela nous permet à la fois d'enregistrer la couverture corallienne, la diversité des habitats coralliens, mais également d'évaluer notre méthode rapide d'approche paysagère en la comparant à la méthode LIT éprouvée mais généralement plus longue.

La deuxième phase est celle de contrôle ou d'acquisition de données de validation des cartes : une colonne de la fiche habitat (décrivant un site de 5 m × 5m) est renseignée pour un maximum de sites.

L'une des précautions majeures à la suite du travail de terrain consiste à replacer exactement sur l'image les points qui ont été visités. La non perfection du géoréférencement de l'image et l'erreur inhérente au GPS peuvent entraîner des erreurs de localisation et donc de report si les sites traités sont reportés automatiquement. Un contrôle manuel est donc nécessaire.

4.4 Du terrain a la carte

La première étape consiste à créer une typologie. La méthode est la même que ce soit pour les herbiers ou les habitats coralliens. La création de la typologie des herbiers est décrite dans Scamps (2005). Les principes sont les suivants : une classification hiérarchique ascendante des stations de travail est réalisée en utilisant l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis (logiciel Primer®) appliqué à l'ensemble des données des fiches habitats. Dans Primer, les analyses SIMPER et ANOSIM permettent ensuite de déterminer les taux de similarités et de dissimilarités à l'intérieur d'une classe et entre les différentes classes ainsi que la détermination des variables discriminantes dans chaque classe. Le niveau de coupure est choisi de manière à obtenir des classes suffisamment homogènes, en nombre limité (de l'ordre d'une dizaine : nombre optimal de classes d'habitats pouvant être discriminés par IKONOS et QB (Andréfouët et al. 2003) et pertinent thématiquement compte tenu des observations de terrain.

La seconde étape consiste à calculer les signatures spectrales de chaque classe d'habitat, pour chaque image utilisée. Nous utilisons le logiciel ENVI® 3.4 (ENVironment for VISualizing images, Research Systems Inc.) qui permet de visualiser, de traiter et d'analyser les images satellitales. Il permet notamment de réaliser des classifications supervisées. Les sites d'apprentissages sont d'abord attribués à une classe de la typologie et représentés sous forme d'un polygone (ou ROI=Region Of Interest). Ces ROI peuvent être étendus aux pixels voisins s'ils présentent un signal radiométrique très proche de manière à obtenir un nombre de pixel par classe identique (afin d'éviter un biais statistique).

Puis vient l'étape de classification de l'images à proprement parler : chaque pixel de l'image est automatiquement attribué par l'algorithme de classification d'ENVI à l'une des classes définies. Les algorithmes possibles sont multiples, mais de manière générale, nous appliquons l'algorithme du Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood) à équiprobabilité des classes.

La quatrième étape est l'étape de validation. Les points de contrôle issus des vérités terrains sont à leur tour affectés à une des classes. Certains points peuvent être ajoutés par photo-interprétation si le quota de points (une centaine) nécessaire à la validité de l'analyse n'est pas

atteint. Typiquement, nous disposons de très peu de point vérité terrain « sable » puisque nous préférons concentrer nos efforts sur les zones hétérogènes plus intéressantes à notre étude. Ces points sont rajoutés sans réelle possibilité d'erreur par photo-interprétation. La matrice de confusion obtenue nous renseigne sur la qualité de notre classification en quantifiant les erreurs d'affectations de pixels. Si la qualité obtenue n'est pas satisfaisante, il faut revenir à l'étape d'apprentissage, vérifier que chaque ROI a été défini proprement et que les pixels ajoutés par photo-interprétation n'ont pas biaisé le processus. Le produit final obtenu est donc atteint après une suite d'itérations qui peuvent être effectuée sur l'ensemble de l'image ou par sous-zones dont le choix peut-être déterminant pour l'optimisation des résultats.

L'étape finale est une étape de généralisation des classes: en pratique, il s'agit d'éliminer les pixels solitaires, d'améliorer les zones bruitées, et de lisser les contours afin d'obtenir une carte plus lisible et plus facilement utilisable pour un gestionnaire après son exportation dans un logiciel de manipulation de données vecteurs (SIG).

4.5 Index corallien

Un index est simplement une combinaison mathématique des réflectances mesurées dans les différentes bandes spectrales. Les réflectances totales sont extraites de l'image pour les stations où ont été effectués les transects et les fiches habitats. Nous cherchons une relation statistique (best fit) entre les données de couvertures coralliennes et ces réflectances pour estimer la faisabilité d'un index corallien.

En parallèle à notre travail, la comparaison des couvertures coralliennes estimées par la méthode « fiche habitat » et LIT, ainsi que la typologie du récif Aboré, a été réalisé par Annick Cros (Cros 2005).

4.6 Synthèse des sites visités

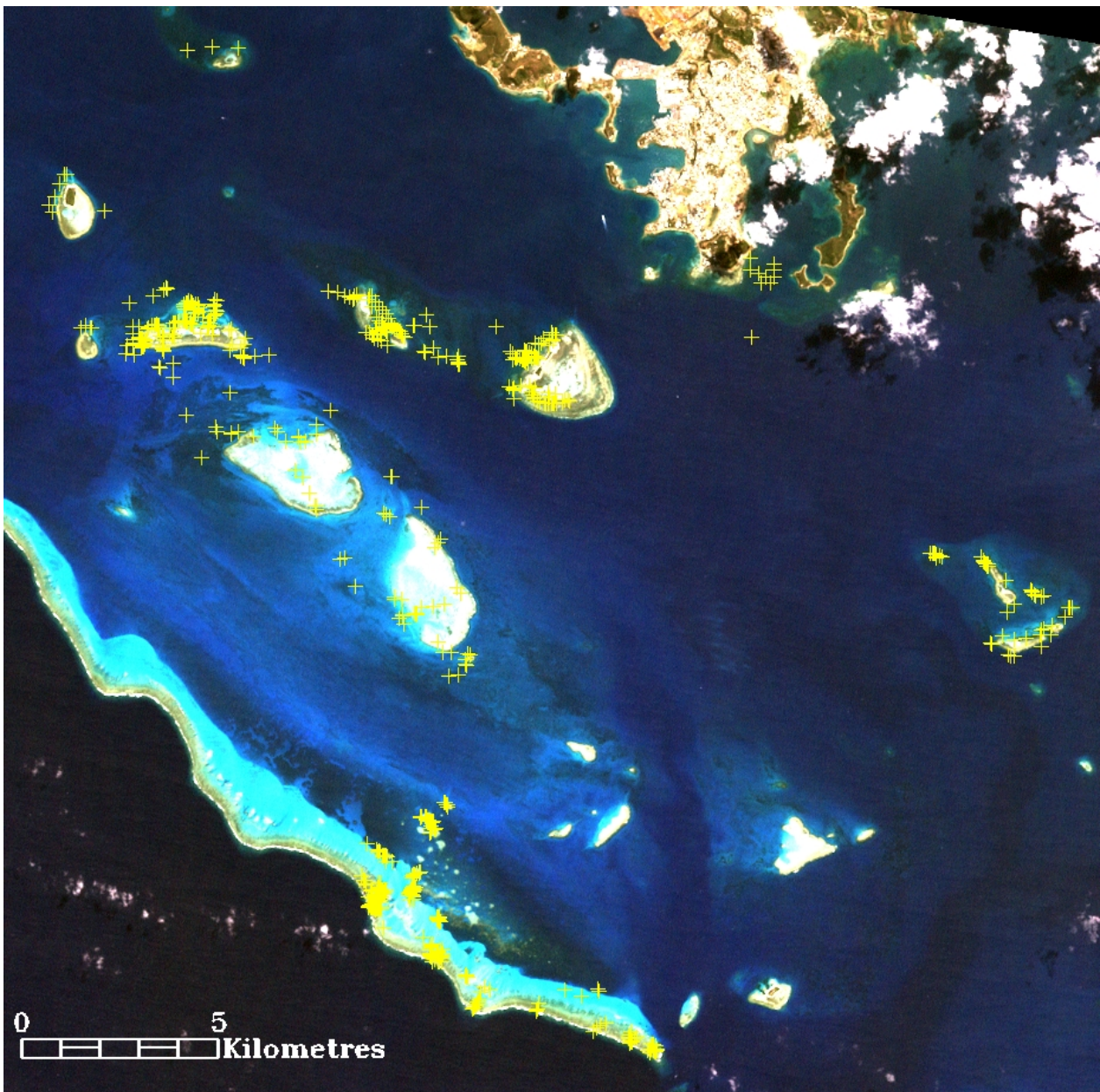


Figure 3 : Stations d'apprentissage et de contrôle sur la zone Lagon Sud et récif Aboré.



Figure 4 : Stations d'apprentissage et de contrôle autour de l'île Balabio.

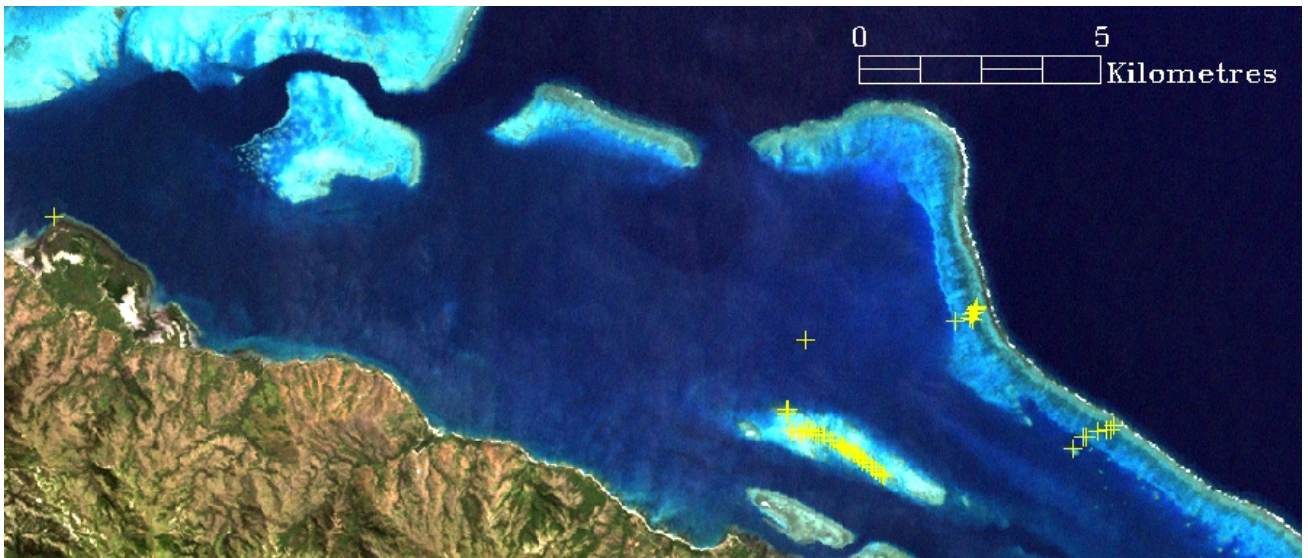


Figure 5 : Stations d'apprentissage et de contrôle sur la zone Pouébo-Amoss.

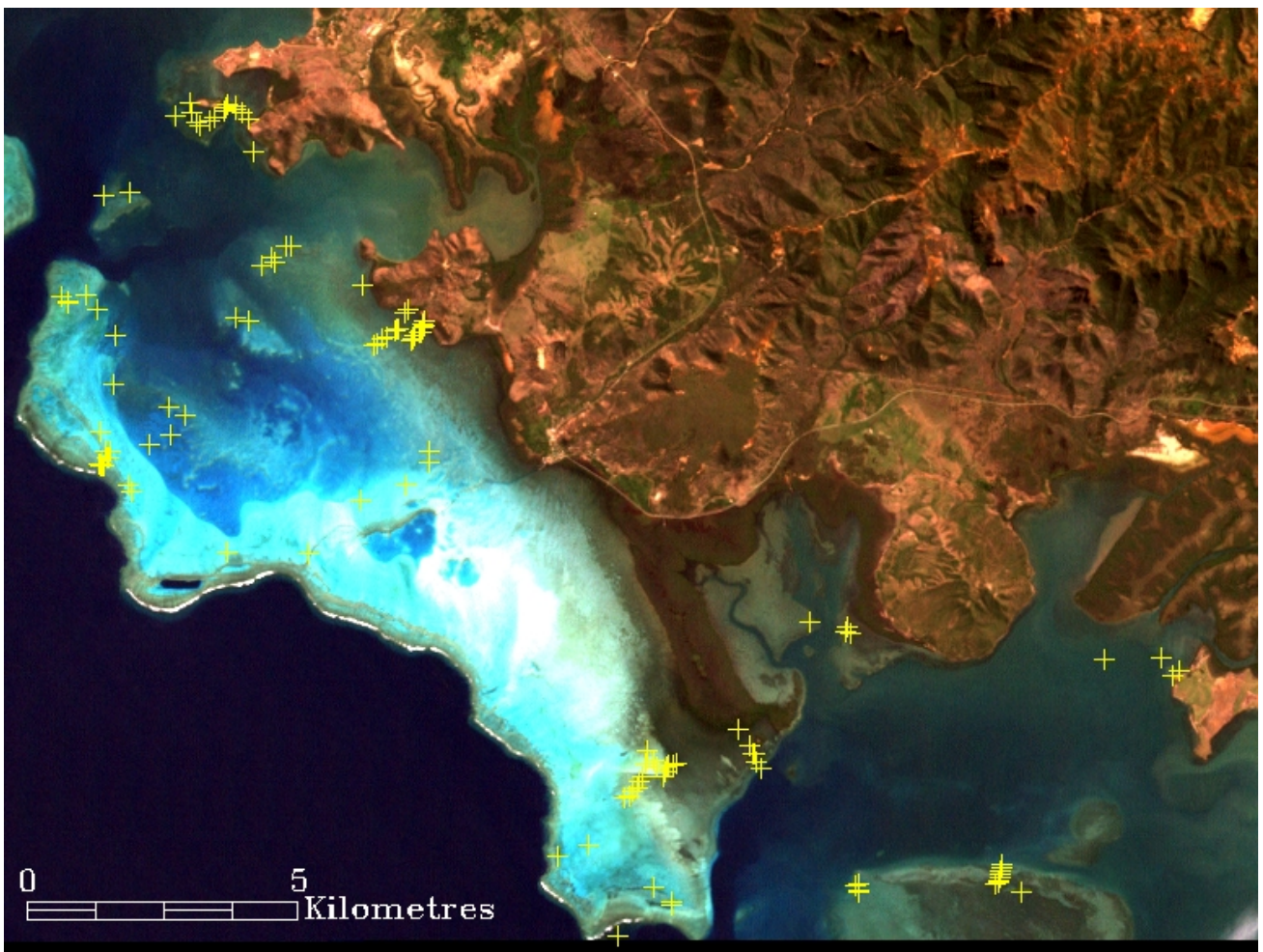


Figure 6 : Stations d'apprentissage et de contrôle sur la zone de Koné

5 Etats des lieux, problèmes rencontrés et résultats préliminaires

5.1 Typologie des herbiers et cartographie

5.1.1 Typologie générale des herbiers de Nouvelle-Calédonie

Cette première typologie, tirée de Scamps (2005), est basée sur des données quantitatives de 23 stations réparties sur les zones de Balabio, Koné et Lagon Sud.

❖ Les algueraies :

- Groupe 1 : les algueraies à Phaeophyta.
 - Algueraie présente dans tout le lagon de Nouvelle Calédonie, avec une densité et une composition variable en Phaeophyta.
 - Profondeur variable, avec sable détritique blanc.
 - Absence de phanérogames.
 - Algues dominantes : Phaeophyta (Sargacées, Dictyotales).
 - Algues compagnes : Chlorophyta et rares Rhodophyta.
 - Densité variable.

❖ Les herbiers à *Halodule uninervis* :

- Groupe 2 : les herbiers de récif.
 - Herbier homogène rencontré sur un récif du lagon sud ouest.
 - Profondeur de 3 m sur sable détritique blanc.
 - Phanérogames prédominantes : *Halodule uninervis* et *Halophila ovalis*.
 - Phanérogames compagnes absentes.
 - Cortège algal : rares Chlorophyta (uniquement des *Halimeda*).
 - Herbier diffus.
- Groupe 3 : les herbiers mono spécifiques à *Halodule uninervis*
 - Herbiers rencontrés dans le lagon nord est.
 - Profondeur de 1,5 à 2m sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Halodule uninervis*.
 - Phanérogames compagnes : *Cymodocea rotundata*, et rares *Halophila* spp, *Thalassia hemprichii* et *Enhalus acoroides*.
 - Cortège algal : Chlorophyta et de Phaeophyta (jusqu'à un maximum de 30% de la couverture) et rares de Rhodophyta.
 - Herbiers très denses.
- Groupe 4 : les herbiers bispécifiques à *Halodule uninervis* et *Cymodocea serrulata*, affleurant à marée basse.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon sud ouest.
 - Platier affleurant à marée basse sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Halodule uninervis* et *Cymodocea serrulata*.
 - Phanérogames compagnes : *Syringodium isoetifolium*.
 - Cortège algal : Chlorophyta, Phaeophyta et Rhodophyta (jusqu'à 15%).
 - Herbiers denses.
- Groupe 5 : les herbiers bispécifiques à *Halodule uninervis* et *Cymodocea serrulata*.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon sud ouest.
 - Profondeur variant de 1 à 7m sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Halodule uninervis* et *Cymodocea serrulata*.

- Phanérogames compagnes : *Syringodium isoetifolium*, *Halophila* spp
- Cortège algal : Chlorophyta, Phaeophyta (pour moins de 10%) et rares Rhodophyta.
- Herbiers de densité moyenne.

❖ **Les herbiers à *Thalassia hemprichii* :**

- Groupe 6 : les herbiers mono spécifiques à *Thalassia hemprichii*.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon nord est.
 - Platier découvrant à marée basse sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Thalassia hemprichii*.
 - Phanérogames compagnes : *Cymodocea rotundata*, et *Enhalus acoroides* et rares d'*Halophila* spp.
 - Cortège algal : présence de Rhodophyta et traces de Chlorophyta.
 - Herbiers exceptionnellement denses.
- Groupe 7 : les herbiers bispécifiques à *Thalassia hemprichii* et *Enhalus acoroides*.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon autour de Koné.
 - Profondeur de 0,5m, sur sable gris envasé.
 - Phanérogames prédominantes : *Thalassia hemprichii* et *Enhalus acoroides*.
 - Phanérogames compagnes : *Cymodocea serrulata* et *Syringodium isoetifolium*, et rares *Cymodocea rotundata*.
 - Cortège algal : Chlorophyta.
 - Herbiers très denses.
- Groupe 8 : les herbiers à mélange homogène de phanérogames.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon autour de Koné.
 - Profondeur de 0,5m, sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Thalassia hemprichii*, *Cymodocea serrulata*, *Cymodocea rotundata* et *Halodule uninervis*.
 - Phanérogames compagnes : *Halophila* spp et rares *Syringodium isoetifolium*.
 - Cortège algal : Chlorophyta (pouvant atteindre 40% de la couverture) et rares Rhodophyta et de Phaeophyta.
 - Herbiers denses.
- Groupe 9 : les herbiers à *Thalassia hemprichii*, *Cymodocea rotundata*, et *Halodule uninervis*.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon nord est.
 - Profondeur de 0,5m, sur sable gris.
 - Phanérogames prédominantes : *Thalassia hemprichii*, *Cymodocea rotundata* et *Halodule uninervis*.
 - Phanérogames compagnes : *Syringodium isoetifolium*, et d'*Halophila* spp.
 - Cortège algal : Phaeophyta et majoritairement Chlorophyta, rares Rhodophyta.
 - Herbiers denses.

❖ **Les herbiers à *Enhalus acoroides* :**

- Groupe 10 : les herbiers à *Enhalus acoroides*.
 - Herbiers rencontrés dans le lagon nord est.
 - Profondeur de 0,5m, sur fond vaseux.
 - Phanérogames prédominantes : *Enhalus acoroides*.
 - Phanérogames compagnes : rares *Halophila* spp et *Halodule pinifolia*.
 - Cortège algal : rares Chlorophyta.
 - Herbiers de densité variable, structurés en patch.

5.1.2 Exemple d'une cartographie d'herbiers à partir d'une image Landsat7

Nous présentons ici une cartographie de la zone de Balabio effectuée à partir d'une image Landsat7. Les herbiers à phanérogames représentent deux classes à part entière : la classe « herbier » et la classe « herbier profond ». Ces classes sont composées des groupes 3, 6 et 9 de la typologie des herbiers. La capacité à distinguer une classe de la typologie d'une autre est liée à la résolution spatiale et spectrale du capteur. Il est impossible, mis à part pour certaines classes très particulières comme les herbiers à *Enhalus* par exemple, d'obtenir une classification aussi précise que la typologie, a fortiori avec des image Landsat7 (résolution spatiale de 30m).

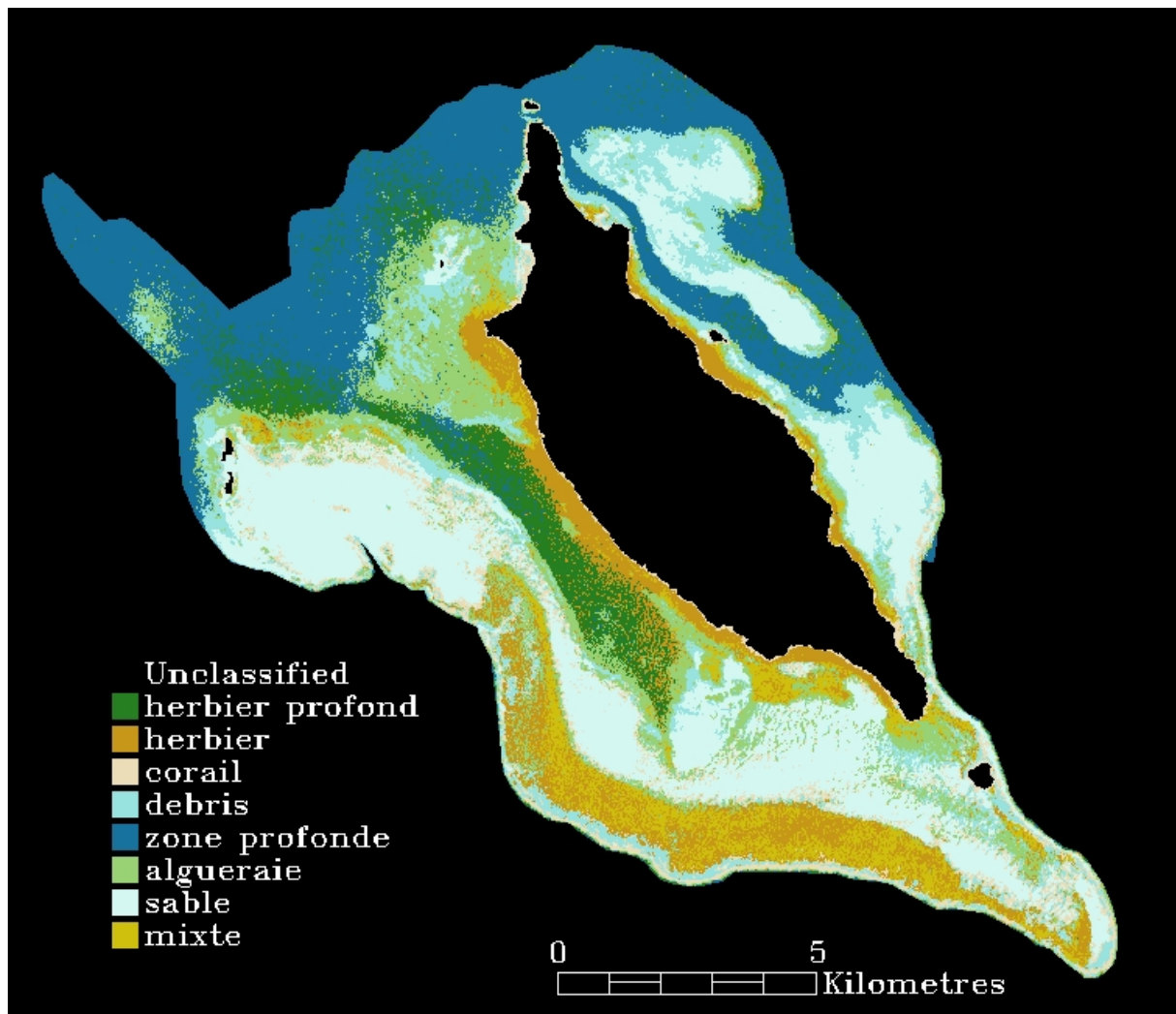


Figure 7 : classification supervisée des habitats de Balabio à partir d'une image Landsat 7

La matrice de confusion associée à cette classification est donnée ci-dessous. C'est cette matrice qui nous permet d'évaluer la qualité d'une classification. La donnée « overall accuracy », qui est ici de 73,8%, donne une idée de la précision de la classification. Mais ce n'est réellement qu'en interprétant les tableaux (matrices de confusions) qui suivent que nous pouvons nous faire une bonne idée de la qualité de la classification.

Les deux premiers tableaux présentent sous forme de comptes numériques et sous forme de pourcentage la distribution des points de contrôle dans les différentes classes après le processus de classification. Dans la première colonne nous apprenons que parmi les 98 points de vérité terrain « herbiers profonds », après le processus de classification, 73 ont été effectivement classés comme « herbier profond », et 25 ont été classés comme « herbier ». Ces 25 points constituent l'erreur par omission de cette classe. Dans la deuxième ligne nous apprenons donc que 88 points ont été classés « herbier profond » et que parmi ces points 1 aurait dû être classé « herbier », 7 « eau » et 7 « algueraie ». Ces 15 points constituent l'erreur par commission.

Le troisième tableau reprend sous forme synthétique les erreurs par omission et par commission.

Le dernier tableau présente la précision de la classification si l'on se place du côté du producteur de la carte ou de l'utilisateur. Du point de vue du producteur, 73 des 98 points « herbier profond » ont été correctement classés, du point de vue de l'utilisateur 73 des 88 points classés « herbier profond » sont effectivement de l'herbier profond.

Tableau 2 : matrices de confusion associées à la classification des herbier de Balabio à partir d'une image Landsat7

Confusion Matrix:

Overall Accuracy = (584/791) 73.8306%

Kappa Coefficient = 0.7016

Class	Ground Truth (Pixels)								Total
	herbier profo	herbier	corail	débris	Zone profonde	algueraie	sable	mixte	
Unclassified	0	0	0	0	11	0	1	0	12
herbier profo	73	1	0	0	7	7	0	0	88
herbier	20	60	0	4	0	5	0	15	104
corail	0	2	62	24	0	2	1	0	91
débris	0	2	8	64	0	5	0	0	79
Zone profonde	3	0	0	0	81	1	0	0	85
algueraie	2	23	2	1	2	76	0	14	120
sable	0	0	26	5	0	0	98	0	129
mixte	0	9	0	1	0	3	0	70	83
Total	98	97	98	99	101	99	100	99	791

Class	Ground Truth (Percent)								Total
	herbier profo	herbier	corail	débris	Zone profonde	algueraie	sable	mixte	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	10.89	0.00	1.00	0.00	1.52
herbier profo	74.49	1.03	0.00	0.00	6.93	7.07	0.00	0.00	11.13
herbier	20.41	61.86	0.00	4.04	0.00	5.05	0.00	15.15	13.15
corail	0.00	2.06	63.27	24.24	0.00	2.02	1.00	0.00	11.50
débris	0.00	2.06	8.16	64.65	0.00	5.05	0.00	0.00	9.99
Zone profonde	3.06	0.00	0.00	0.00	80.20	1.01	0.00	0.00	10.75
Algueraie	2.04	23.71	2.04	1.01	1.98	76.77	0.00	14.14	15.17

Sable	0.00	0.00	26.53	5.05	0.00	0.00	98.00	0.00	16.31
Mixte	0.00	9.28	0.00	1.01	0.00	3.03	0.00	70.71	10.49
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
herbier profo	17.05	25.51	15/98	25/98
Herbier	42.31	38.14	44/97	37/97
Corail	31.87	36.73	29/98	36/98
Débris	18.99	35.35	15/99	35/99
Zone profonde	4.71	19.80	4/101	20/101
Algueraie	36.67	23.23	44/99	23/99
Sable	24.03	2.00	31/100	2/100
Mixte	15.66	29.29	13/99	29/99

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
herbier profo	74.49	82.95	73/98	73/88
herbier	61.86	57.69	60/97	60/104
corail	63.27	68.13	62/98	62/91
débris	64.65	81.01	64/99	64/79
Zone profonde	80.20	95.29	81/101	81/85
Algueraie	76.77	63.33	76/99	76/120
Sable	98.00	75.97	98/100	98/129
Mixte	70.71	84.34	70/99	70/83

L'analyse des tableaux nous montre que la classification est de bonne qualité. L'ensemble des erreurs par commission et omission sont réalisées entre des classes très proche : herbier et herbier profond, mixte avec herbier et algueraie, corail avec sable et débris. Ce qu'il faut retenir c'est qu'aucune de ces classes n'est pure. Elles ont des frontières spatiales et thématiques floues (Andefouët et al. 2000, IEEE) : la classe corail regroupe du corail mort et vivant pouvant être mêlé à des débris ou du sable en plus ou moins grande quantité. La classe herbier profond est une classe qualitative, elle n'est pas définie par une profondeur précise. Un herbier contient toujours des algues, et une zone mixte peut être dominée par les phanérogames ou les algues suivant l'endroit. La typologie rend compte de ces limites floues entre les classes en autorisant un degré de variation au sein de chaque classe d'habitat. A leurs limites spatiales et thématiques, les classes se chevauchent, ce qui se reflète dans la matrice de confusion.

5.1.3 Apport de la haute résolution : exemple d'une classification à partir d'une image Quickbird

La première image haute résolution que nous ayons reçue est l'image Quickbird de Koné. Un premier essai de classification des habitats a été réalisé. Le résultat ainsi que la typologie associée sont présentés ci-après.

Typologie d'habitats :

- classe 1 : Herbier très dense à *Cymodocea serrulata*, présence d'*Halodule uninervis* et de *Syringodium isoetifolium*. Nombreux patchs d'*Enhalus acoroides* mixés avec *Halimeda macroloba*
- classe 2 : herbier mixte dominé par *Cymodocea serrulata*, présence d'*Halodule uninervis*, *Syringodium isoetifolium* ou *Thalassia hemprichii*, avec algues vertes (*Caulerpes spp.* et *Halimeda spp.*) jusqu'à 50%
- classe 3 : herbier mixte (*Cymodocea serrulata*, *Halodule uninervis*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium* parfois dominant), algues vertes (*Caulerpes spp.* et *Halimeda spp.*), algues brunes (*Cystoseira*, *Phylotrichia*, *Dictyota*, *Cladosiphon ...*)
- classe 4 : patchs de corail mort et vivant, d'algues brunes, de phanérogames et de sable
- classe 5 : sable, débris et corail mort épars
- classe 6 : patates éparses peu vivantes sur sable
- classe 7 : sable peu profond
- classe 8 : zone non cartographiée (eau turbide)

La classe 3 décrite ici correspond au groupe 8 de la typologie de Scamps(2005).

Les données qualitatives acquises lors des dernières missions de terrains (Moindou, Lagon Sud) font apparaître de nouveaux assemblages d'espèces de phanérogames qui vont nous amener à augmenter cette typologie, notamment pour prendre en compte les classes 1 et 2 décrites ci-dessus. Des groupes à *Cymodocea serrulata* dominant devront être ajoutés mais également un groupe à *Syringodium isoetifolium* dominant rencontré dans la zone Lagon Sud.

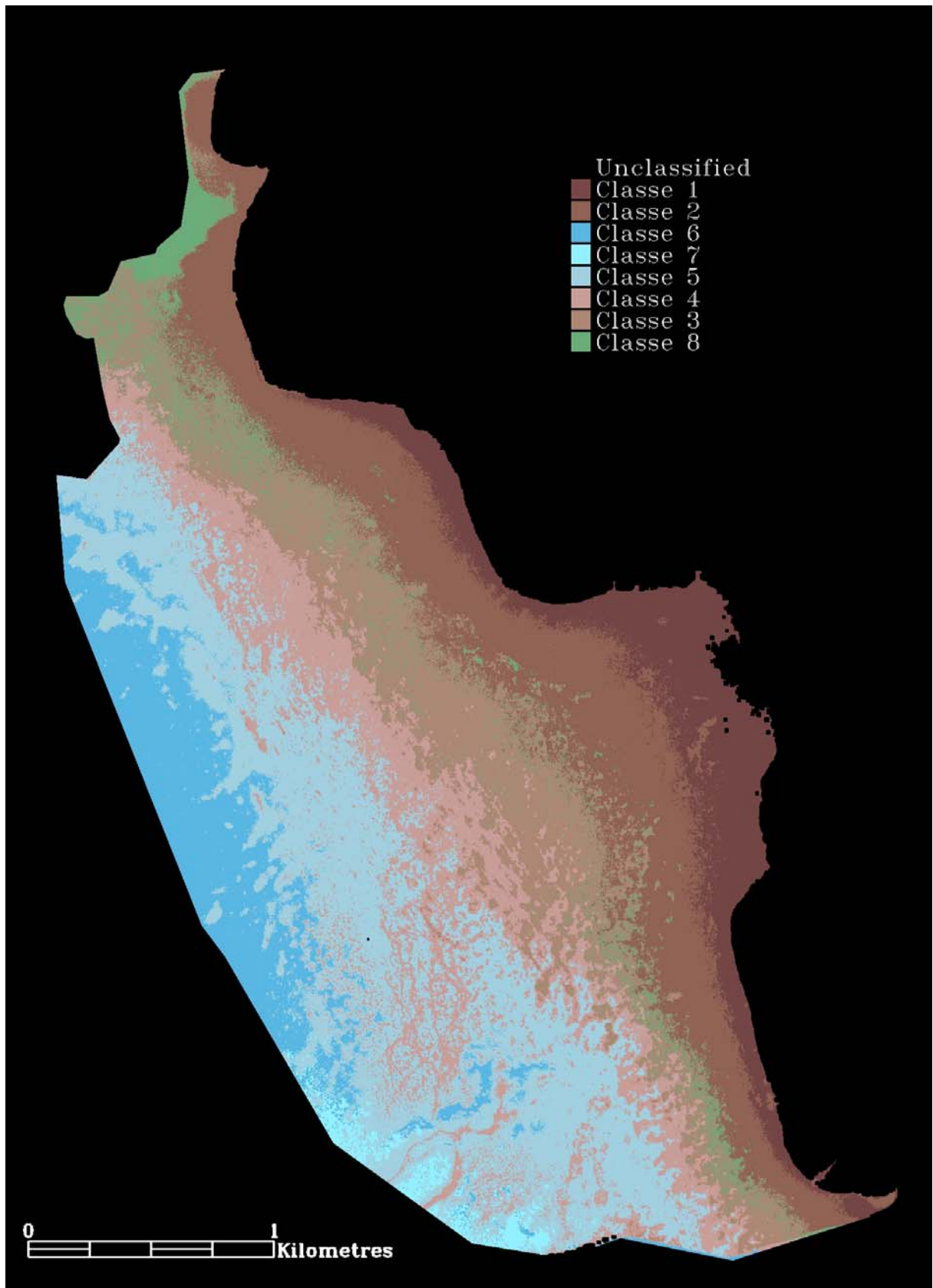


Figure 8 : classification supervisée d'une zone d'herbier entre Gatope et Oundjo (zone Voh-Koné) à partir d'une image Quickbird

Dans le cas de Kone, les vérités terrains effectuées sur la zone ne nous permettent pas d'établir la matrice de confusion associée à la classification de ces différents habitats par manque de points. Toutefois, de manière qualitative, le gradient spatial apparaissant sur la carte (herbiers denses côtiers, devenant plus diffus puis laissant la place aux algueraies puis au sable) correspond parfaitement aux observations réalisées in situ sur quelques transects.

L'utilisation de la haute résolution est une arme à double tranchant. D'un côté, elle permet d'augmenter la richesse thématique de la carte en permettant de cartographier de plus nombreuses classes avec précision. Toutefois, ceci implique que le travail de validation devient beaucoup plus lourd puisqu'on considère qu'il faut 50 points de validation par classe pour établir une matrice de confusion sans biais. Compte tenu des phases de terrain sur sites qui durent une semaine, il nous faut donc trouver un compromis entre la richesse thématique capturée et la rigueur de la validation. En général, nous effectuons donc des transects de contrôle dans les zones hétérogènes comme celle de la Figure 9, et nous vérifions que la cartographie reproduit bien les transitions observées le long du transect.

5.2 Typologie habitats Koné et cartographie partielle.

5.2.1 Typologie basée sur les données de terrain

Habitats Koné

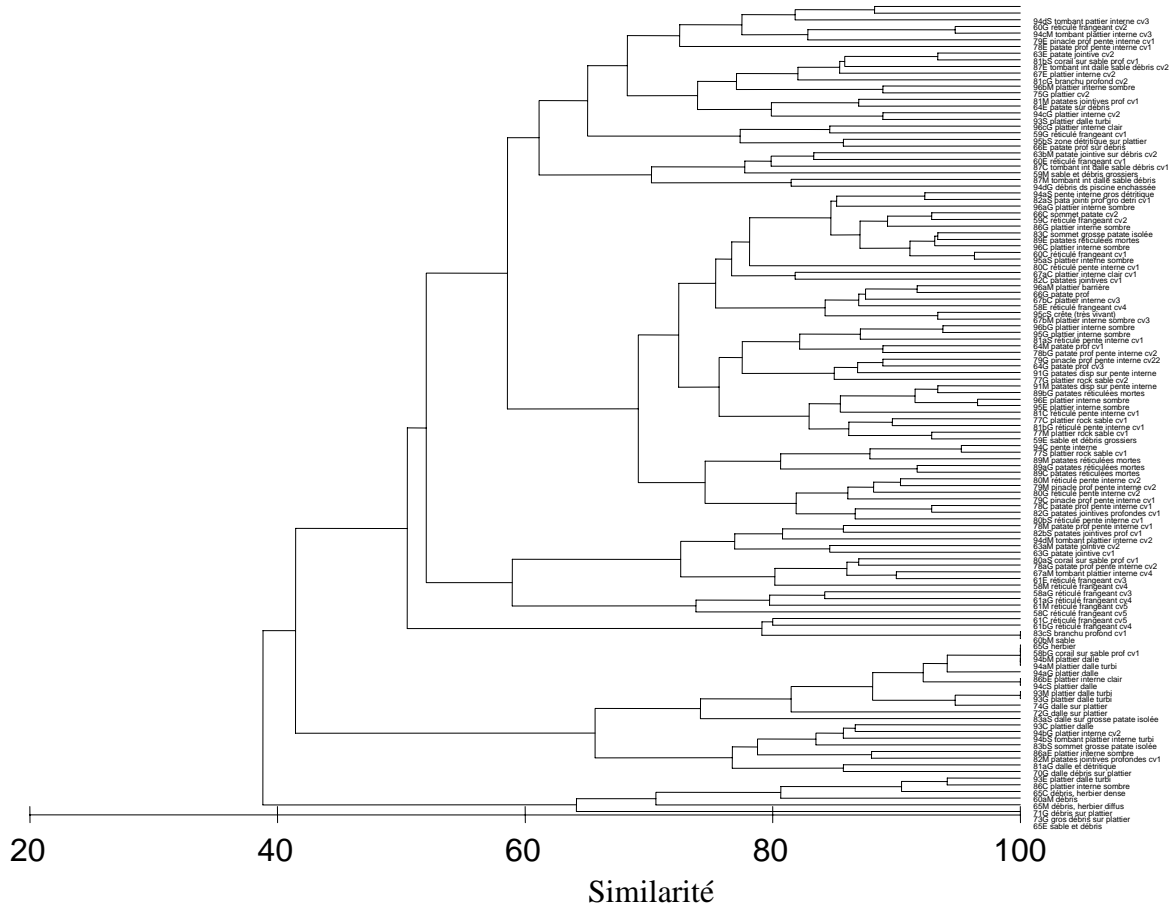


Figure 9 : résultat de la classification hiérarchique des habitats sous forme de dendrogramme

La typologie des habitats de la zone de Koné (excluant les zones frangeantes d’herbier et d’alguaie) a été obtenue en réalisant une classification hiérarchique à partir des données des fiches habitats. Le choix de la coupure à un certain niveau de similarité a été fait de manière à créer des classes homogènes au niveau thématique autorisé par la méthodologie et la résolution de l’image satellite.

9 classes ressortent de cette classification. Elles ont pour noms génériques:

- débris
- platier dalle
- sable

- récif réticulé à très forte couverture corallienne
- récif réticulé mort
- escarpement
- platier vivant (couverture corallienne >30%)
- platier rock (couverture corallienne < 30%)
- débris grossiers

5.2.2 Exemple de carte thématique

La typologie obtenue à partir des données de terrain peut différer de la typologie finale de la carte pour plusieurs raisons :

- la proximité radiométrique de certaines classes ne permet pas de les différencier l'image : ainsi, par exemple, les stations présentant un fort couvert de l'algue brune *Turbinaria spp.* sur dalle se trouvent dans la classe « platier dalle » de la classification hiérarchique, alors qu'elles se retrouvent dans la classe « rock » de la carte (cf. ci-après)

- le travail de terrain n'est pas toujours suffisant pour permettre de descendre au niveau thématique atteint par la classification hiérarchique : l'ambiguïté sur la classification de certaines zones ne peut être levée aisément sans vérité terrain et nous ne pouvons donc généraliser notre connaissance de certaines zones à l'ensemble du récif sans un important risque d'erreur.

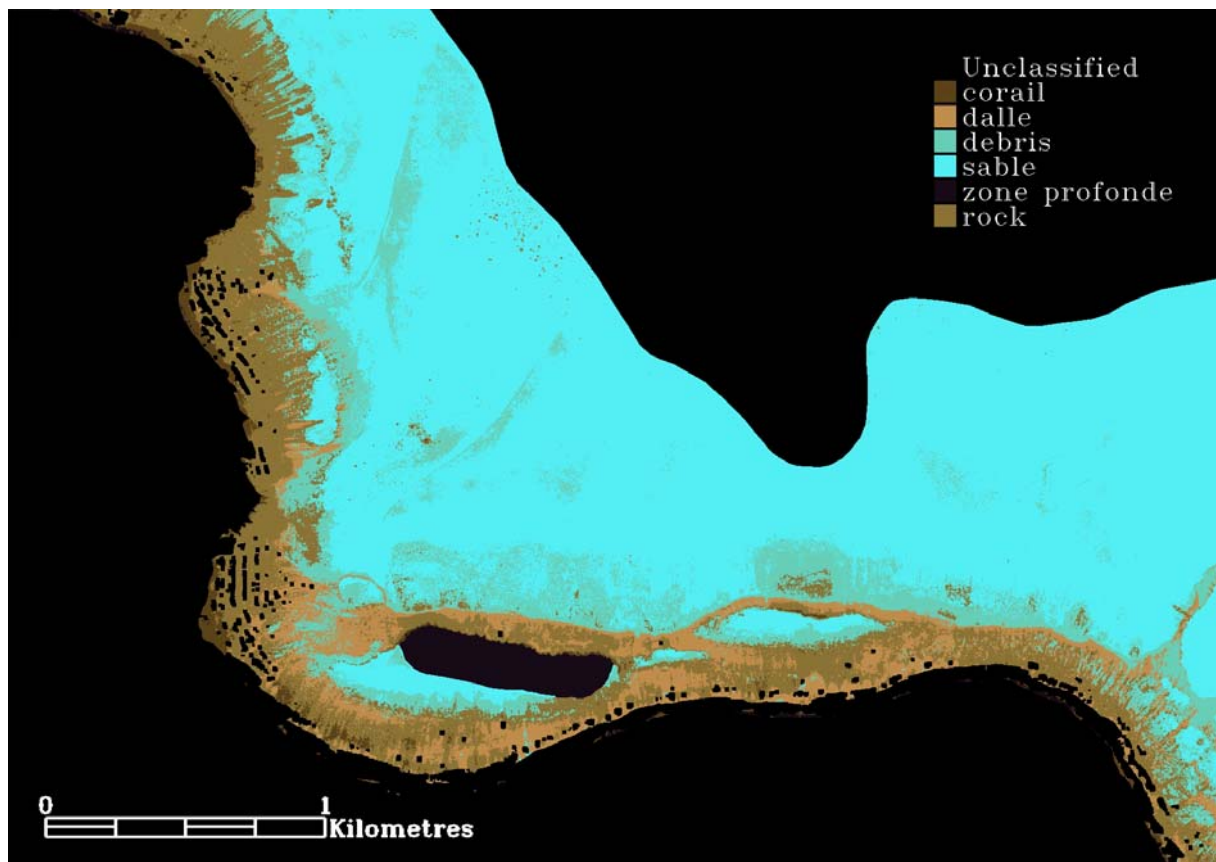


Figure 10 : extrait d'une cartographie d'habitats réalisée à partir de l'image QB de Koné

La zone présentée en exemple est un extrait du platier et de la pente interne du récif de Koné.

La typologie proposée finalement présente 5 classes d'habitat sur cette zone. La justesse de la classification a été privilégiée par rapport à sa précision thématique. Pour comparaison, 15 sorties sur le récif Aboré nous ont permis de réaliser une classification du platier et de la pente interne en 9 classes d'habitat au total.

La typologie associée à cette carte est la suivante :

- **corail** : zone du platier marquée par une forte présence de coraux vivants (plus de 40%)
- **dalle** : zone de dalle encroûtée de coralline
- **débris** : zone dominée par des débris plus ou moins grossier : débris grossiers sur le platier, cuvette de débris sur le platier, zone détritique d'arrière platier avec une proportion variable de sable, ou zone de sable et débris sur dalle.
- **sable** : zone de sable dans la pente interne, plus ou moins mêlé à des débris.
- **rock** : zone de platier récifal présentant une faible couverture corallienne (pouvant toutefois atteindre exceptionnellement 40%) pouvant être constituer de coraux morts plus ou moins érodés, de rainures de débris cimentés par des algues encroûtantes, de débris très grossiers, de dalle couverte de *Turbinaria spp.*

La classe « zone profonde » correspond à des zones non accessibles par imagerie satellitale ; « unclassified » correspond aux zones de déferlement des vagues, aux nuages, et aux zones géomorphologiques masquées (pente externe, pente interne construite) car traitées séparément.

Dans le cas présent, le niveau de coupure (en % de similarité) choisi permet d'obtenir une typologie en accord avec le degré de précision permis par la donnée satellitale.

5.3 Indice Corallien

Les tests statistiques réalisés jusqu'à présent (régression linéaire, régressions multiples) n'ont pas donnés de résultats satisfaisants encourageant la mise en place d'un index. Il ne semble pas possible d'établir un index corallien robuste dès que la signature est brouillée par la présence d'algues (turf, *Lobophora* encroûtante), ce qui n'est pas vraiment étonnant compte tenu des signatures multispectrales proches pour ces deux thèmes (Hochberg et al. 2003b).

Tableau 3 :données de radiances totales du satellite et de couverture corallienne correspondante sur le terrain

	band 1	band 2	band 3	band 4	Lat	Lon	corall
1	409,333344	590,555542	234,666672	56,666668	-22,437602	166,38186	1
2	427,888885	615,333313	247,333328	55	-22,437709	166,381954	1
3	405,333344	576,555542	233,777771	55,333332	-22,437991	166,382004	1
4	427,666656	608,444458	235,666672	54,555557	-22,438293	166,3821	1
5	463,777771	675	257,222229	53,444443	-22,438359	166,382054	1
6	420	600,222229	232,777771	53,444443	-22,438443	166,382311	1
7	410,111115	587,222229	239	55	-22,438528	166,382522	1
8	414,555542	591,666687	237,222229	55	-22,438549	166,382546	1
9	373,777771	537,777771	228,111115	59,444443	-22,438822	166,383621	0
10	355,444458	496,555542	207,777771	58	-22,438887	166,383668	3
11	374,666656	558,444458	256,666656	57,333332	-22,454215	166,370574	1
12	365,444458	484,777771	180,666672	53,666668	-22,454641	166,37902	2
13	352,111115	460,777771	177,222229	55,888889	-22,454664	166,378927	2
14	362,333344	469,888885	182,555557	54	-22,454946	166,378907	3
15	505,222229	684,888916	200,888885	54,222221	-22,455018	166,378901	3
16	365	489,666656	198	57,111111	-22,455119	166,378909	2
17	406,555542	562,1111084	211,777771	57,666668	-22,455235	166,378024	3
18	486,111115	721,777771	295,777771	60,222221	-22,455379	166,371332	2
19	426,111115	623,555542	258,777771	61,111111	-22,45551	166,378749	1
20	460,222229	688,666687	297,111115	64,888885	-22,455544	166,369701	2
21	474	695,888916	284,333344	62,222221	-22,45566	166,371358	2
22	451,888885	662	260,666656	57,888889	-22,455785	166,3694	2
23	385,777771	540,333313	226,444443	61	-22,455813	166,378799	2
24	350,333344	475,333344	193	58,888889	-22,455899	166,378916	3
25	320,555542	366,777771	111,555557	53,444443	-22,456158	166,379012	3
26	484,222229	717,777771	302,444458	61,666668	-22,45629	166,371201	2
27	499,888885	731,555542	293,111115	58	-22,456413	166,369429	1
28	420,666656	597,666687	249,666672	62,555557	-22,456621	166,3782	2
29	343,666656	443,222229	159,444443	58,333332	-22,456659	166,378737	3
30	407	576,222229	241,111115	62,222221	-22,456663	166,378271	4
31	464,666656	671,1111084	277,111115	60,111111	-22,456877	166,37095	0
32	537,777771	786,888916	304,666656	59	-22,457302	166,369438	1
33	484	723,1111084	295,777771	60,222221	-22,457391	166,369206	3
34	488,666656	732,444458	300	61,888889	-22,457982	166,368489	1
35	420,777771	637,333313	293,333344	77	-22,4582	166,368328	0
36	435,555542	665,666687	299,111115	72,222221	-22,458484	166,36812	1
37	614,444458	828,777771	225,555557	60,444443	-22,458544	166,3712	1
38	444,666656	645,666687	279,666656	63,777779	-22,458647	166,369265	3
39	472,222229	703,333313	298,777771	62,555557	-22,458671	166,369079	1
40	435,666656	616,666687	283,222229	64,222221	-22,45872	166,370922	3
41	434,777771	639,1111084	282,666656	66,666664	-22,458739	166,36636	3
42	444,222229	606,888916	225,444443	63,666668	-22,458742	166,370922	2
43	430,888885	606,888916	225,444443	63,666668	-22,458745	166,370572	2
44	468,888885	651,666687	267,666656	66,111115	-22,458849	166,371086	2
45	471,111115	685,555542	268,444458	61	-22,458855	166,37034	2
46	475,888885	687,444458	273,666656	59	-22,458924	166,369897	1
47	449,333344	646,666687	264,333344	58,555557	-22,459033	166,369828	3
48	397,777771	541,1111084	218,777771	64,666664	541,1111084	218,777771	2
49	482,222229	658,777771	251,888885	76,888885	658,777771	251,888885	2
50	447,888885	641,555542	249,666672	81,555557	641,555542	249,666672	2
51	466,111115	690,444458	271,333344	74,777779	690,444458	271,333344	1
52	508,111115	704,555542	215	71,555557	704,555542	215	0
53	453,333344	675,222229	268,666656	75,777779	675,222229	268,666656	0
54	460,666656	660,555542	252,444443	78,222221	660,555542	252,444443	1
55	450,111115	642,333313	237,444443	79,888885	642,333313	237,444443	1
56	437,777771	670,555542	297,444458	82,666664	670,555542	297,444458	0
57	483,777771	712,1111084	267,333344	79,333336	712,1111084	267,333344	1
58	484,888885	712,333313	261,666656	78,333336	712,333313	261,666656	0
59	435,444458	660,444458	299,333344	87,555557	660,444458	299,333344	0
60	480	745,888916	332,888885	89,111115	745,888916	332,888885	0
61	489,888885	765,777771	349,444458	91,222221	765,777771	349,444458	0
62	477,333344	738,222229	330,666656	92,888885	738,222229	330,666656	0
63	480	745,666687	334,888885	89,444443	745,666687	334,888885	0
64	484,111115	762,444458	347,444458	91,888885	762,444458	347,444458	0
65	487,666656	764,777771	349,555542	93,333336	764,777771	349,555542	0
66	472,222229	737,222229	336,444458	97,777779	737,222229	336,444458	0
67	528	800,777771	353,444458	91,444443	800,777771	353,444458	0
68	520,1111084	775,555542	326,333344	85,111115	775,555542	326,333344	3
69	520,555542	775	330,222229	89,111115	775	330,222229	3
70	363,111115	511,777771	186,222229	62,444443	511,777771	186,222229	2
71	418,888885	600,1111084	233	66,444443	600,1111084	233	0
72	428,222229	639,555542	270,444458	67,444443	639,555542	270,444458	0
73	473,333344	710,1111084	306,777771	74,777779	710,1111084	306,777771	0
74	372,333344	539,888916	244,333328	76,888885	539,888916	244,333328	0
75	405,222229	596,888916	289,666656	93,333336	596,888916	289,666656	0
76	428,555542	651	293,222229	86,333336	651	293,222229	0
77	418,666656	642,444458	310	99,777779	642,444458	310	0
78	397,555542	579,888916	237,888885	64,888885	579,888916	237,888885	0
79	399,444458	582,888916	239,111115	64,444443	582,888916	239,111115	1
80	389,444458	559,444458	228,444443	67,444443	559,444458	228,444443	0
81	409,333344	605,666687	269,333344	66,333336	605,666687	269,333344	5
82	414,555542	609,666687	269,333344	66,333336	609,666687	269,333344	2
83	424,888885	624,222229	267	67,444443	624,222229	267	1
84	380,111115	546	247	68,777779	546	247	4
85	358,888885	517,222229	242,111115	81,333336	517,222229	242,111115	1
86	358,666656	520,777771	241,555557	76,333336	520,777771	241,555557	2
87	393,555542	578,888916	234	62	578,888916	234	2
88	402,444458	597,666687	264,777771	69,222221	597,666687	264,777771	0
89	391	581,777771	271,888885	78,222221	581,777771	271,888885	0
90	406,111115	599,777771	273,222229	73,555557	599,777771	273,222229	1
91	363,222229	556,666687	232,444443	64	556,666687	232,444443	2
92	352	500,777771	228,444443	76	500,777771	228,444443	0

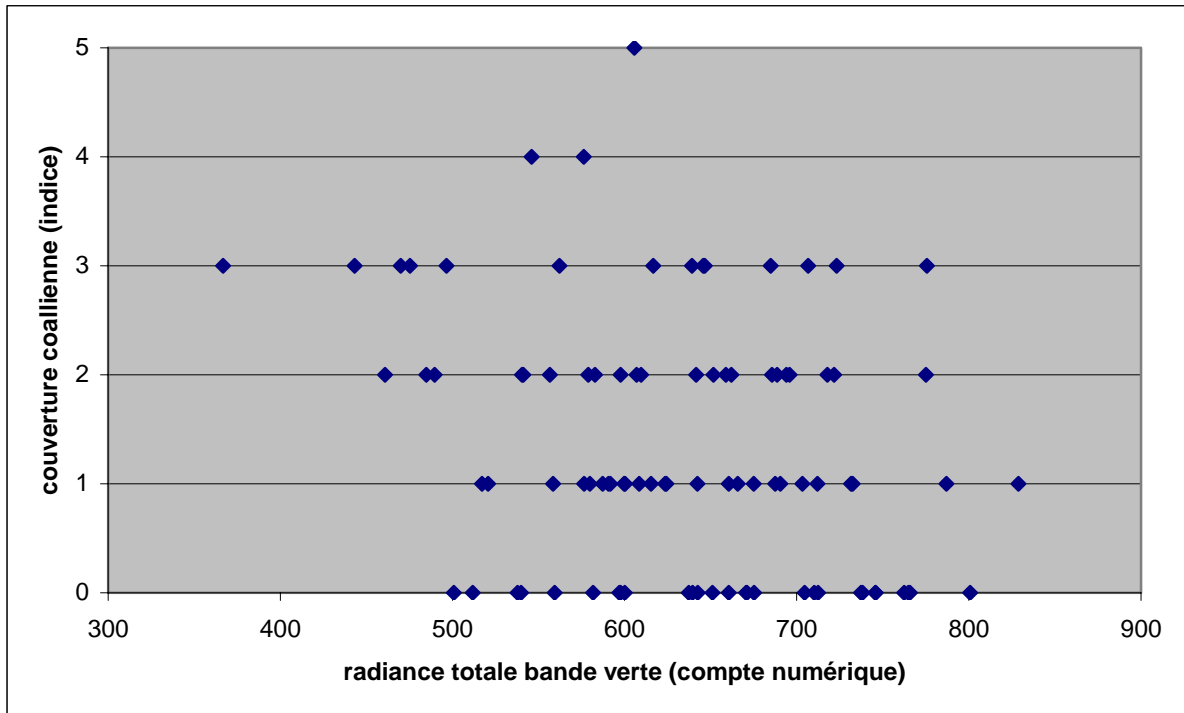


Figure 11 : couverture corallienne vs radiance totale de la bande verte

La figure 12 met en évidence la très grande variabilité de signal radiométrique pour une même couverture corallienne.

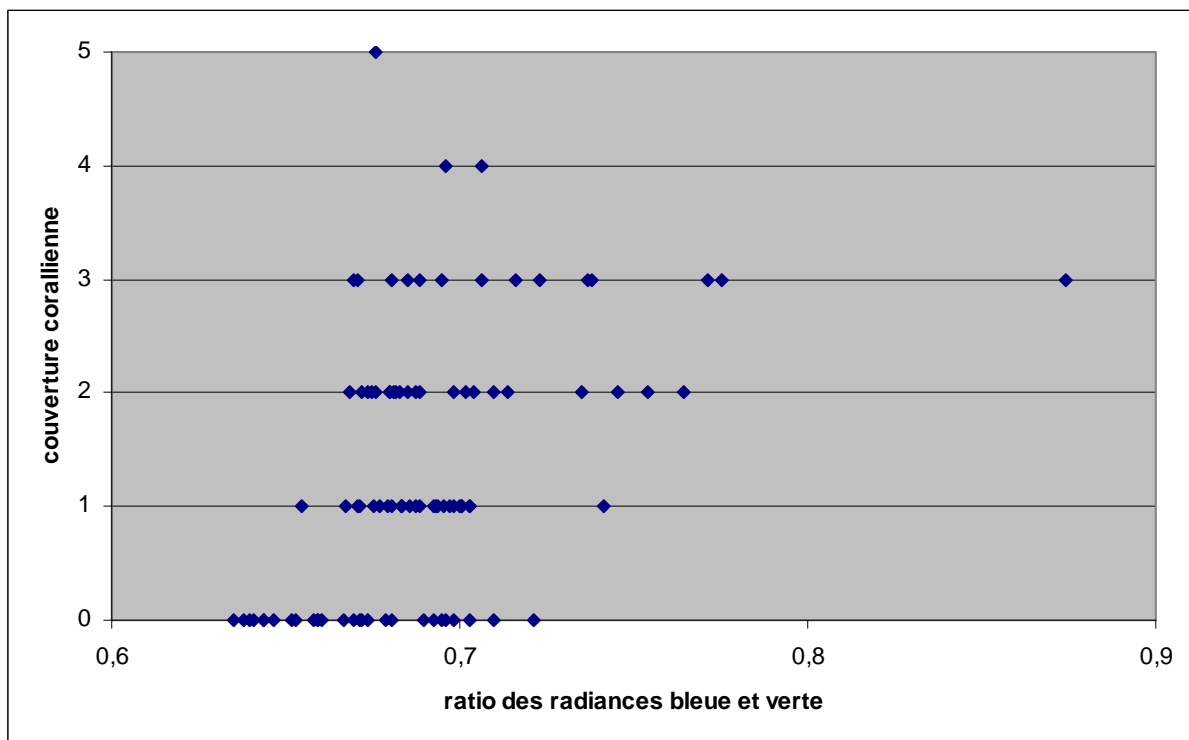


Figure 12 : couverture corallienne vs ratio des bandes bleue et verte

Le ratio de bandes utilisé dans la figure 13 permet de s'affranchir en partie de la variation du signal du à la profondeur : la variabilité interne à une même classe de couverture corallienne persiste.

Cette variabilité radiométrique rend impossible l'utilisation systématique d'un indice du type de celui présenté dans Bour (1990, 1997) pour la détermination de la couverture corallienne.

Un test sera effectué pour la cartographie de la couverture corallienne en utilisant une méthode géomatique plus complexe d'interpolation spatiale utilisé récemment sur les récifs du Yucatan (Garza-Perez et al. 2004). Il s'agit d'utiliser comme relation statistique un modèle de type GLM non paramétrique pour lier radiométries et couvertures coralliennes pour les sites d'apprentissage, puis le module SIG généralise le résultat à partir des images.

5.4 Problèmes rencontrés

Outre les problèmes liés aux conditions météorologiques inhérents au travail en mer, d'autres problèmes ont été rencontrés :

- problème de la disponibilité de la donnée satellitale : les données hautes résolutions n'étaient pas encore disponibles au moment des missions de terrains à Balabio/Balade, Koné et Aboré. Pour Balabio, Balade et Koné, la position des sites à visiter a été choisie à partir d'images à moindre résolution (Landsat7) qui ne permettent pas de voir la structure de certains habitats et donc de les repérer. Pour Aboré, nous disposions d'une image haute résolution IKONOS (4m×4m) du 16/04/2002, qui nous a guidée dans le choix de nos stations. Nous avons pu constater sur le terrain de nombreuses contradictions avec ce que nous nous attendions à trouver d'après l'image. L'arrivée de la nouvelle image, malheureusement à la fin de notre travail de terrain, a confirmé les nombreux changements constatés, dû au cyclone Erika.

- problème de disponibilité et d'adaptation des moyens naviguant : la pression sur les moyens naviguant de l'IRD est telle qu'il n'est pas possible de disposer du N/O Coris pour une période continue de deux semaines. Le travail de collecte de données s'est donc étalé sur quatre mois, ce qui ralentit considérablement le traitement des données et la réalisation du travail « final ». De plus le bateau ne permet pas de travailler en zone peu profonde (platier), obligeant les plongeurs à parcourir de grande distance à la nage dans des zones à fort courants. L'utilisation d'un engin à turbines (type jet-ski) aurait grandement amélioré l'efficacité du travail de terrain et la sécurité des personnes dans ces milieux peu profonds à faible courant.

6 Perspectives

Deux missions de terrain destinées à la cartographie des habitats récifaux restent à réaliser sur les zones de Thio et de Ouassé.

La première carte des herbiers du lagon sud réalisée à partir d'une image Landsat7 permet une première zonation des herbiers mais ne permet pas de fournir des détails sur les communautés de phanérogames et d'algues présentes. Le Lagon Sud est la zone sur laquelle nous avons

collecté le plus de données de terrain sur les herbiers. L'image Quickbird va nous permettre de tirer profit de ces données et de réaliser une carte plus précise et nous l'espérons plus discriminante du point de vue écologique.

L'étape finale consistera à regrouper et à homogénéiser l'ensemble des cartes et des typologies. Des typologies sont réalisées à partir de chaque jeu de données collecté sur le terrain. Ces typologies sont adaptées aux sites visités. Une typologie générale des habitats devra être réalisée à partir de l'ensemble des sites afin de pouvoir refondre toutes les typologies en une seule applicable à l'ensemble de la Nouvelle Calédonie.

Une fois cette typologie générale obtenue, l'ensemble des cartes réalisées pourra être homogénéisé.

Un autre logiciel de traitement de l'image, eCognition, a été testé pour la réalisation de cartes d'habitats. Ce logiciel utilise des fonctions avancées de segmentation de l'image, de classifications floues et de fusion. Ces fonctions devraient nous permettre d'accélérer la réalisation de cartes thématiques et d'améliorer le rendu. La durée de mon travail ne m'a pas permis de consacrer le temps nécessaire pour pouvoir tirer profit de ces fonctions. Néanmoins ce logiciel est un outil puissant qu'il serait intéressant d'évaluer de façon plus poussée.

7 Bibliographie

Andréfouët, S., L. Roux, et al. (2000). "A fuzzy possibilistic scheme of study for objects with indeterminate boundaries: application to french polynesian reefs." IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing **38**(1): 257-270.

Bour, W., L. Loubersac, et al. (1986). "Thematic mapping of reefs by processing of simulated SPOT satellite data: application to the *Trochus niloticus* biotope on Tetembia Reef (New Caledonia)." Marine Ecology Progress Series **34**: 243-249.

Bour, W. and M. Pichon (1997). Discrimination of scleractinian-dominated from other reef communities using SPOT satellite imagery. 8th Int. Coral Reef Symp., Panama.

Cros, A, G. Dirberg, A. Andrefouet (2005). "Preliminary assessment of habitat diversity and coral cover along Abore Reef using in situ and remote sensing data", rapport de stage IRD

Garza-Perez, J. R., A. Lehmann, et al. (2004). "Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial modeling and remote sensing." Marine Ecology Progress Series **269**: 141-152.

Hochberg, E. and M. Atkinson (2003). "Capabilities of remote sensors to classify coral,algae and sand as pure and mixed spectra." Remote Sensing of Environment **85**(2): 174-189.

Hochberg, E. J., S. Andrefouet, et al. (2003). "Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments." IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing **41**(7): 1724-1729.

Scamps, M, C. Payri, S. Andrefouet (2005). "Les herbiers de Nouvelle Calédonie : Inventaire, caractérisation et typologie, Télédétection et cartographie." rapport de stage IRD

Remerciements

Ce travail a été financé par le programme ZoNeCo et a été réalisé au sein de l'UR 128 Coréus au Centre IRD de Nouméa.

Je remercie Adrien Rivaton de l'Adecap et Damien Buisson du SMAI pour le suivi administratif du projet et le suivi des commandes d'images.

Je remercie enfin toutes les personnes de l'IRD qui ont contribué à ce travail : Serge Andréfouët tout particulièrement, mais également Claude Payri, le service plongée de l'IRD : Jean-Louis Menou, Catherine Geoffrey, Eric Folcher, les capitaines du Coris et de l'Aldric: Samuel Tereua et Miguel Clarque, et les stagiaires Mathilde Scamps et Annick Cros.